ChinaXiv合作期刊

 doi 10.3969/j.issn.1673-4254.2015.06.07 J South Med Univ, 2015, 35(6): 812-815

临床研究

# 运动负荷对正常腰椎间盘MR扩散张量成像表观弥散系数和各向异性分数的影响

钟 秀[1,2],邱士军[3]
[1]南方医科大学,广东 广州 510515;[2]内蒙古医科大学第二附属医院影像科,内蒙古 呼和浩特 010030;[3]广州中医药大学第一附属医院影像科,广东 广州 510405

**摘要:目的** 探讨运动负荷对正常腰椎间盘MR扩散张量成像(DTI)中表观弥散系数(ADC)和部分各向异性(FA)的影响。**方法** 对30例健康志愿者行常规矢状位FSE/$T_2$WI成像及运动负荷前后DTI成像,其中男性24名,女性6名,年龄19~25岁。在MR常规$T_2$WI序列上对腰椎间盘按Pfirrmann标准进行退变分级,利用DTI原始数据重组b0图、ADC图及FA图,测量并比较运动负荷前后ADC值、FA值的变化。统计方法使用重复测量数据的方差分析,$P$<0.05具有统计学意义。**结果** 30名志愿者,观测$L_1$~$S_1$共计150个椎间盘,将其中27例腰椎间盘Pfirrminn分级均为Ⅱ级的受试者纳入研究。腰椎间盘平均ADC值运动负荷前为(1.99±0.18)×$10^{-3}$ mm²/s,运动负荷后为(1.93±0.17)×$10^{-3}$ mm²/s,较运动负荷前下降,差异具有统计学意义($P$<0.05);腰椎间盘平均FA值运动负荷前为0.155±0.059,运动负荷后为0.163±0.017,较运动负荷前升高,差异不具有统计学意义($P$>0.05)。**结论** 磁共振DTI成像可以定量分析运动负荷后腰椎间盘水分子扩散能力及各向异性程度的变化。运动负荷后,腰椎间盘ADC值下降,FA值升高,其中ADC值的变化更为敏感。

**关键词:**腰椎间盘;扩散张量成像;表观弥散系数;部分各向异性;运动负荷

## Effect of exercise load on apparent diffusion coefficient and fractional anisotropy of normal lumbar intervertebral discs in diffusion tensor imaging

*ZHONG Xiu[1, 2], QIU Shijun[3]*
*[1]Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; [2]Department of Radiology, Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Huhehaote 010030, China; [3]Department of Radiology, First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510405, China*

**Abstract: Objective** To investigate the effect of exercise load on apparent diffusion coefficient (ADC) and fractional anisotropy (FA) of normal lumbar intervertebral discs in magnetic resonance (MR) diffusion tensor imaging (DTI) . **Methods** Thirty healthy volunteers (24 males and 6 females, aged 19 to 25 years) underwent examinations with MR $T_2$WI and DTI of the lumbar intervertebral discs before and after exercise load. Pfirrmann grading was evaluated with $T_2$WI, and the B0 map, ADC map and FA map were reconstructed based on the DTI data to investigate the changes in ADC and FA after exercise. **Results** Of the 30 volunteers (150 intervertebral discs) receiving the examination, 27 with discs of Pfirrminn grade II were included for analysis. In these 27 volunteers, the average ADC and FA before exercise were (1.99±0.18)×$10^{-3}$ mm²/s and 0.155±0.059, respectively. After exercise, ADC was lowered significantly to (1.93±0.17)×$10^{-3}$ mm²/s ($P$<0.05) and FA increased slightly to 0.1623±0.017 ($P$>0.05). **Conclusion** DTI allows quantitatively analysis of the changes in water molecular diffusion and anisotropy of the lumbar intervertebral discs after exercise load, which can cause a decreased ADC and a increased FA value, and the change of ADC is more sensitive to exercise load.

**Key words:** intervertebral disc; diffusion tensor imaging; fractional anisotropy; fractional anisotropy; dynamic load

磁共振扩散张量成像(DTI)是在扩散加权成像(DWI)基础上发展起来的一种功能磁共振(fMRI)成像技术,通过测量组织的各向同性ADC值和部分各向异性FA值,可以在三维空间内定量分析水分子微观水平的扩散速率及方向。DTI最早运用于中枢神经系统,近年来国内外一些学者将其运用于椎间盘退变的定量研究[1-5],发现正常椎间盘与退变椎间盘的ADC值、FA值存在差异。

椎间盘在负荷状态下髓核压力增高,其扩散特征也相应发生变化。离体动物标本实验证实椎间盘在负荷后扩散能力减低并与负荷的方向和负荷水平相关[6],但

**收稿日期:**2015-03-10
**基金项目:**国家自然科学基金(81360278,81271389,81471251)
Supported by National Natural Science Foundation of China (81360278, 81271389, 81471251).
**作者简介:**钟 秀,主治医师,在读博士研究生,E-mail: zhongx928@sina.com
**通信作者:**邱士军,主任医师,教授,博士研究生导师,E-mail: qiu-sj@163.com

chinaXiv:201712.01046v1

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201712.01046v1

是关于运动负荷对活体椎间盘扩散特征影响的研究少见报道。本文通过对30例健康青年志愿者进行运动负荷前后腰椎DTI检查，测量各节段腰椎间盘负荷前后的ADC值、FA值，分析运动负荷对正常腰椎间盘扩散特征的影响，进而为运动负荷引起腰椎间盘早期退变的机制做出一定提示。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

研究经医院伦理委员会讨论通过，所有受试者均知情同意并签署知情同意书。纳入标准为：无慢性下腰痛病史，无腰部外伤史及手术史，无脊柱发育异常，无核磁检查禁忌症的健康青年人。受试对象共30名，其中男性24名，女性6名，年龄19~25(22.07±1.78)岁，体质量指数(BMI)16.73~23.42(21.73±1.47) kg/m$^2$，无体质量过重者。

### 1.2 MR扫描方法及参数

采用GEMR3601.5T磁共振扫描仪进行扫描，应用脊柱线圈，扫描体位为仰卧位，运动负荷前后10 min内各扫描1次。为避免生理状态所引起的差异，本研究扫描的时间均在19:00~22:00完成。

受试者在第1次扫描前2 h内未做过剧烈运动，平卧位休息20 min后进行FSE/T$_2$WI及DTI矢状位扫描。FSE/T$_2$WI扫描参数：TR 2200 ms，TE 120 ms，层厚4 mm，层距1 mm，FOV32 cm，矩阵320×256，NEX=4；DTI序列扫描参数：EPI扫描层数7层，矩阵176×256，扫描野中心线定位于腰椎正中矢状面L$_3$椎体后下缘，平均采集次数6次，TR2500 ms，TE84 ms，层厚4 mm，层距为0，扩散方向为11个，扩散梯度因子b值设为400 s/mm。椎体前方设置预饱和带，以减少呼吸及胃肠蠕动造成的伪影，饱和带宽30 cm，成像时间108 s。

第1次扫描结束后，受试者进行腰部负荷运动，之后只进行矢状面DTI扫描，参数同前。为保障受试者的运动负荷量相当，所有的受试者均以相同的速率在相同的时间内完成同一套腰部运动操，用时共计15 min。

### 1.3 观测指标

1.3.1 腰椎间盘分级　在矢状位FSE/T$_2$WI序列图像上进行腰椎间盘Pfirrminn分级[7]，分级标准为：Ⅰ级，椎间盘高度正常，信号均匀，高于或等于脑脊液信号，髓核与纤维环分界清晰；Ⅱ级，椎间盘高度正常，椎间盘内有不均匀结构，有或无水平界限，髓核与纤维环分界清楚；Ⅲ级，椎间盘高度轻度降低，椎间盘内有中等信号和不均匀结构，髓核与纤维环分界模糊；Ⅳ级，椎间盘高度中度降低，椎间盘内有低信号和不均匀结构，髓核与纤维环界限消失；Ⅴ级，同Ⅳ级相似，但伴有椎间盘塌陷。其中，Ⅰ级和Ⅱ级椎间盘为正常椎间盘(图1)。

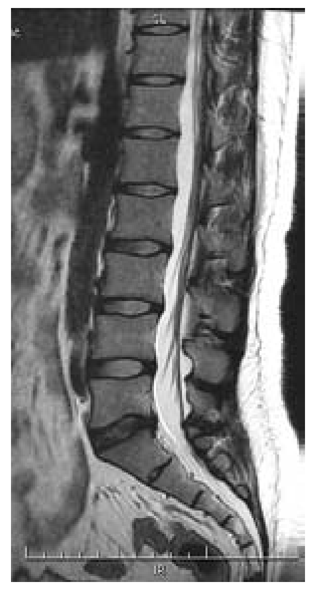


**图1 腰椎间盘Pfirrminn分级(T$_2$WI)**
Fig.1 Pfirrminn grading system in T$_2$WI. L$_{1/2}$, L$_{2/3}$, L$_{3/4}$, and L$_{4/5}$ discs assessed as gradeII, and L$_5$/S$_1$disc assessed as grade III.

1.3.2 ADC值、FA值测定　利用GE-ADW4.6后处理工作站中的function tool软件对DTI原始数据进行处理，生成b0图、ADC图及FA图。在b0图上，选取腰椎矢状面的正中层面，即椎管前后径最宽的层面，对L1~S1椎间盘髓核区自前向后取前、中、后三点进行ADC值及FA值的测定，取圆形感兴趣区(ROI)，每个ROI为大小为15~24 mm$^2$，避开上下椎体终板及脑脊液，每个椎间盘的ADC及FA值取此3处ROI的平均值(图2A)。

### 1.4 统计方法

所得数据用SPSS20.0统计软件进行分析，因同一受试者进行了L$_1$~S$_1$共5个节段以及运动负荷前后两个时间点的测量，故应用重复测量数据的方差分析。再应用配对资料$t$检验分别对腰椎各节段椎间盘运动负荷前后ADC值及FA值变化的进行比较。$P$<0.05时认为组间差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 腰椎间盘Pfirrminn分级结果

30名志愿者，观测L$_1$~S$_1$共计150个椎间盘，除3例L$_5$/S$_1$椎间盘Pfirrminn分级为Ⅲ级，其余147个椎间盘均为Ⅱ级(图1)。3例具有Ⅲ级椎间盘者未纳入研究，最终纳入研究者27例。

### 2.2 腰椎间盘运动负荷前后ADC值、FA值的比较

运动负荷后，腰椎间盘的平均ADC值较运动负荷前下降，差异具有统计学意义($F$=8.389，$P$=0.008)；各节段分别比较，L$_{1/2}$、L$_{2/3}$椎间盘运动负荷后ADC值下降具有统计学意义($P$<0.05)，其余3个节段椎间盘ADC值变化不具有统计学意义($P$>0.05，表1)。运动负荷后，腰椎

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201712.01046v1

间盘FA值较运动负荷前升高,但是无论是分节段比较,还是全部腰椎间盘的平均FA值与运动前比较,差异均不具有统计学意义($P$>0.05,表2)。

表1 $L_1$~$S_1$椎间盘运动负荷前后ADC值比较
Tab.1 ADC of $L_1$-$S_1$ lumbar intervertebral disc before and after exercise load (*Mean*±*SD*, *n*=27)

| Segment | ADC($\times10^{-3}$ mm²/s) | | Total | *t* | *P* |
|---|---|---|---|---|---|
| | Before | After | | | |
| $L_{1/2}$ | 1.88±0.12 | 1.80±0.17 | 1.84±0.15 | 3.334 | 0.002 |
| $L_{2/3}$ | 1.99±0.10 | 1.93±0.15 | 1.96±0.13 | 3.408 | 0.002 |
| $L_{3/4}$ | 2.02±0.09 | 2.00±0.08 | 2.01±0.09 | 1.310 | 0.200 |
| $L_{4/5}$ | 2.06±0.17 | 2.02±0.13 | 2.04±0.15 | 0.458 | 0.650 |
| $L_5/S_1$ | 2.01±0.29 | 1.91±0.11 | 1.96±0.22 | 1.802 | 0.083 |
| Total | 1.99±0.18 | 1.93±0.17 | 1.96±0.17 | *F*=8.389 | 0.008 |

表2 $L_1$~$S_1$椎间盘运动负荷前后FA值的比较
Tab.2 FA value of $L_1$-$S_1$ intervertebral disc before and after exercise load (*Mean*±*SD*, *n*=27)

| Segment | FA | | Total | *t* | *P* |
|---|---|---|---|---|---|
| | Before | After | | | |
| $L_{1/2}$ | 0.183±0.049 | 0.194±0.071 | 0.189±0.060 | -1.168 | 0.252 |
| $L_{2/3}$ | 0.132±0.030 | 0.139±0.049 | 0.135±0.041 | -0.707 | 0.458 |
| $L_{3/4}$ | 0.116±0.034 | 0.126±0.037 | 0.121±0.035 | -1.063 | 0.297 |
| $L_{4/5}$ | 0.129±0.046 | 0.137±0.040 | 0.133±0.043 | -1.245 | 0.223 |
| $L_5/S_1$ | 0.217±0.064 | 0.226±0.093 | 0.222±0.079 | -0.471 | 0.642 |
| Total | 0.155±0.059 | 0.163±0.071 | 0.159±0.065 | *F*=2.536 | 0.123 |

从ADC伪彩图中可以看出,无论运动前后,腰椎间盘均以绿色为主,但是运动后椎间盘的颜色较运动前椎间盘的颜色略浅(图2B、E),说明运动负荷后,腰椎间盘的扩散能力下降。从FA伪彩图中可以看出,无论运动前后,腰椎间盘均以蓝色为主,但是运动后腰椎间盘的颜色较运动前腰椎间盘的颜色略浅(图2C、F),说明运动负荷后,腰椎间盘的各项异性程度升高。

## 3 讨论

成人腰椎间盘由髓核、纤维环及上下软骨终板组成,仅纤维环外1/3有血运,椎间盘的营养途径主要是依靠营养物质从纤维环周边及软骨终板中心向椎间盘的扩散来实现。因此,椎间盘的扩散能力直接影响营养物质的供应和代谢产物的排泄[8]。

DTI成像通过在多个方向上施加扩散敏感梯度测量ADC值及FA值来反映水分子扩散的程度和方向,是目前能够描述水分子扩散速度及方向特征的新技术。DTI最早应用于中枢神经系统,近年来越来越多的学者将其应用于椎间盘退变的相关研究[9-12]。

ADC值和FA值也可以反映载荷状态下椎间盘扩散特征的改变。Ludescher等[13]通过DWI方法研究发现,同一椎间盘在清晨的ADC值显著高于夜晚,间接提示腰椎负荷会造成椎间盘ADC值的下降。蔡兆熙等[14]采用短时轴向负荷模拟人体直立负荷状态,对不同Pfirrmann分级的腰椎间盘进行负荷前后的DTI研究,发现运动负荷后腰椎间盘ADC值下降,但Ⅱ级、Ⅳ级和Ⅴ级椎间盘负荷前后的ADC值差异无统计学意义,而Ⅲ级椎间盘负荷后ADC的下降具有统计学意义,该结果提示轻度退变腰椎间盘负荷后水分子扩散能力下降,扩散的各向异性增加。但是,轴向负荷只是单纯的纵向静态压力,并不能全面反映腰椎的运动状态。

本研究通过DTI的方法,对Pfirrmann分级为Ⅱ级的腰椎间盘进行运动负荷前后ADC值、FA值的测量,结果发现,运动负荷后,腰椎间盘的平均ADC值下降,差异具有统计学意义;FA值升高,差异不具有统计学意义,所得结果与蔡兆熙的报道有所不同。作者考虑其原因主要是正常腰椎间盘弹性良好,具有较好的形变代偿性和扩散代偿性,短时轴向负荷的载荷量与持续时间还不足以引起其扩散特征的显著改变。而本研究所做的运动负荷的载荷量较大,时间较长,并且同时具有扭转负荷,因此对正常腰椎间盘的扩散速率造成影响。

运动负荷引起腰椎间盘ADC值变化的主要原因是改变了髓核内的压力。如Neidlinger等[15]报道,椎间盘在高压力载荷状态下产生形变,内部静水压升高,水分被缓慢挤出。水分丢失增加了椎间盘基质中蛋白多糖浓度和电荷密度,引起渗透压的升高和pH值降低,以上生理状态的改变引起椎间盘扩散能力的下降。该理论也解释了ADC值变化显著而FA值变化不具有显著性这一现象,运动负荷改变的主要是水分子的含量和扩散程度,即各项同性扩散,FA值的升高可能是因为水分丢失引起了腰椎间盘内生化成分的比例有所改变,而短时间的运动负荷不可能改变椎间盘组织结构的排列特征,因此水分子扩散的各向异性程度变化不显著。Isu等[16]研究发现,生理状态昼夜周期性的压力变化促进可溶性分子进入椎间盘,并通过椎间盘周围的循环直接或间接给予椎间盘细胞以生理刺激,而急性的机械损伤或蓄积性的超载荷可导致椎间盘的退变。

本研究还发现,分节段比较,$L_{1/2}$、$L_{2/3}$这2个节段椎间盘在运动前后ADC值的变化具有统计学意义,而$L_{3/4}$、$L_{4/5}$、$L_5/S_1$节段椎间盘运动前后的ADC值不具有统计学意义。作者认为,虽然同样是Pfirrminn分级为Ⅱ级的腰椎间盘,但是高位腰椎间盘相对于低位腰椎间盘早期退变的程度相对较轻,腰椎间盘髓核内蛋白多糖的含量相对较高,因此对于载荷状态对水分子扩散能力的影响较为敏感。

ChinaXiv合作期刊



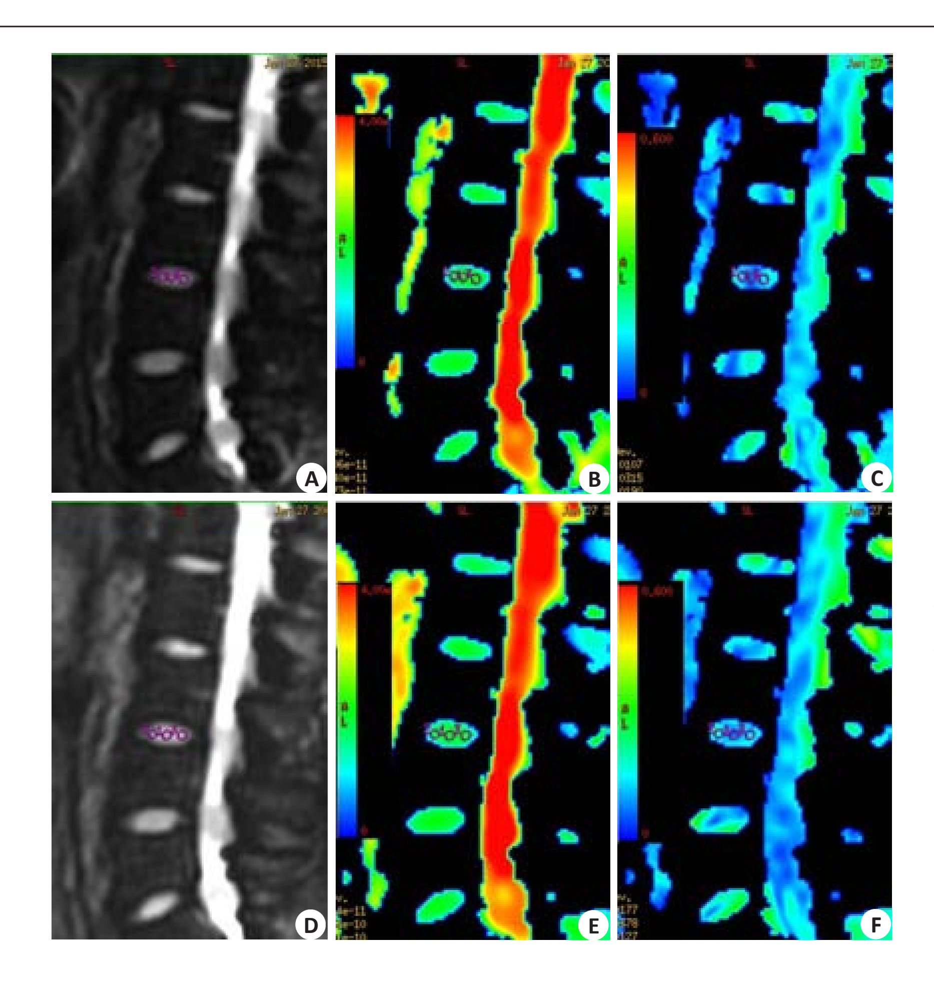



图2 利用DTI重组的运动前后b0图、ADC图、FA图

Fig.2 B0 map, ADC map and FA map reconstructed based DTI data. Three circular ROIs were placed on the anterior, middle, and posterior point of the disc in the middle of the sagittal plane. *A, B, C*: B0 map, ADC map and FA map before exercise, respectively; *D, E, F*: B0 map, ADC map and FA map after exercise, respectively.

总之,核磁共振DTI成像,可以较为敏感地反映腰椎间盘运动负荷后扩散特征的变化。运动负荷后腰椎间盘的扩散程度减低,ADC值下降,提示我们,长期大量的运动负荷会影响腰椎间盘的营养和代谢,可能是引起腰椎间盘退变的原因之一。

## 参考文献:

[1] Niu G, Yu X, Yang J, et al. Apparent diffusion coefficient in normal and abnormal pattern of intervertebral lumbar discs: initial experience[J]. Biomed Res, 2011, 25(3): 197-203.

[2] 张 娅, 陈建宇, 蒋新华, 等. MRI表观弥散系数与腰椎间盘退变分级的相关性[J]. 中国医学影像技术, 2011, 27(6): 1264-7.

[3] 王 娟, 周义成, 夏黎明, 等. 使用ADC值评估正常及退变腰椎间盘的初步研究[J]. 医学影像学杂志, 2006, 16(10): 1093-6.

[4] Antoniou J, Demers CN, Beaudoin G, et al. Apparent diffusion coefficient of intervertebral discs related to matrix composition and integrity[J]. Magn Reson Imaging, 2004, 22(7): 963-72.

[5] Kealey SM, Aho T, Delong D, et al. Assessment of apparent diffusion coefficient in normal and degenerated intervertebral lumbar disks: initial experience[J]. Neuroradiology, 2005, 235(2): 569-74.

[6] Jackson AR, Yuan TY, Huang CY, et al. Effect of compression and anisotropy on the diffusion of glucose in annulus fibrosus[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2008, 33(1): 1-7.

[7] Pfirrmann CW, Metzdorf A, Zanetti M, et al. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(17): 1873-8.

[8] 刘珍珍, 陈建宇, 蔡兆熙, 等. 腰椎间盘退变MRI:T1rho值与Pfirrmann分级及T2值的相关性[J]. 中国医学影像技术, 2014, 30(2): 260-4.

[9] 龙厚清, 林尔坚, 胡 勇, 等. 腰椎间盘MR扩散张量成像及其定量分析[J]. 中国临床解剖学杂志, 2012, 30(1): 44-7.

[10] 赵 建, 郭智萍, 王林峰, 等. 腰痛患者腰椎3.0T MR弥散加权成像腰椎间盘表观弥散系数与椎间盘退变分级的相关性[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(12): 1074-8.

[11] 赵银霞, 李绍林, 张晓东, 等. ADC值、FA值与颈椎间盘退变程度的相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2014, 33(4): 580-4.

[12] 沈 思, 王 昊, 汪 飞, 等. DWI和DTI对腰椎间盘早期退变的诊断价值[J]. 暨南大学学报:自然科学与医学版, 2012, 33(4): 409-13.

[13] Ludescher B, Effelsberg J, Martirosian P, et al. T2- and diffusion-maps reveal diurnal changes of intervertebral disc composition: an *in vivo* MRI study at 1.5 Tesla[J]. J Magn Reson Imaging, 2008, 28(1): 252-7.

[14] 蔡兆熙, 陈建宇, 蒋新华, 等. 轴向负荷对腰椎间盘MR扩散特点的影响[J]. 中华放射学杂志, 2010, 44(8): 837-40.

[15] Neidlinger-Wilke C, Galbusera F, Pratsinis H, et al. Mechanical loading of the intervertebral disc: from the macroscopic to the cellular level[J]. Eur Spine J, 2014, 23(Suppl 3): S333-43.

[16] Isu T, Minoshima S, Takeda M, et al. New surgical technique of anterior decompression for cervical disc disease: vertebral column autograft with the intervertebral disc after anterior cervical decompression[J]. No Shinkei Geka, 1996, 24(9): 823-7.

(编辑:孙昌朋)

chinaXiv:201712.01046v1